

上海市建筑碳排放核算研究

黄蓓佳¹, 崔航¹, 宋嘉玲¹, 俞海勇²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海市建筑科学研究院有限公司, 上海 200032)

摘要: 为有效实现建筑业的节能减排, 实现碳达峰和碳中和, 对建筑碳排放核算方法进行研究。以生命周期理论为基础建立了城市层面的建筑碳计算模型, 并以上海市住宅及非住宅建筑为研究对象核算出上海市建筑领域碳排放。对比上海市住宅建筑及非住宅建筑碳排放量, 研究上海市建筑碳排放趋势。研究表明, 2010—2020年, 上海市建筑领域碳排放持增长态势, 其中建材生产阶段和建筑运行阶段是对建筑总体碳排放量贡献最大的两个阶段。从不同建筑材料碳排放量占比来看, 钢材的碳排放量是建材碳排放量中最高的, 所占比例超过了50%, 其次是水泥、铝材。在建筑减碳路径方面, 结合建筑各生命周期阶段的碳排放核算结果, 提出了对应的减排对策。

关键词: 建筑碳排放; 核算; 生命周期评价; 上海

中图分类号: TU 18 文献标志码: A

Building carbon emission evaluation of Shanghai

HUANG Beijia¹, CUI Hang¹, SONG Jialing¹, YU Haiyong²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: In order to effectively realize the energy saving and emission reduction of construction industry and realize carbon peak and carbon neutrality, the accounting method of construction carbon emission was studied. Based on the life cycle theory, the building carbon calculation model at the urban level was established, and the carbon emissions of residential and non-residential buildings in Shanghai were calculated. By comparing the carbon emissions of residential and non-residential buildings, the carbon emission trend of buildings in Shanghai was studied. The research results show that the carbon emissions in the construction field in Shanghai have maintained a growth trend from 2010 to 2020, and the production stage of building materials and the operation stage of the building are the two stages that have the largest contribution to the overall carbon emissions of buildings. From the perspective of the proportion of carbon emissions of different building materials, the carbon emissions of steel are the highest in the carbon emissions of building materials, accounting for more than 50%, followed by cement and aluminum. In terms of building a carbon reduction path, the corresponding emission reduction counter measures are put forward combining with the carbon emission accounting results of each life cycle stage of the building.

收稿日期: 2022-07-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71974129); 上海市东方学者计划资助(TP2020049); 上海市浦江人才计划资助(20PJ1412000)

第一作者: 黄蓓佳(1984-), 女, 教授. 研究方向: 低碳与可持续发展. E-mail: ywhbjia@163.com

Keywords: *building carbon emissions; evaluation; life cycle assessment (LCA); Shanghai*

城市作为人类生活的空间载体,是温室气体主要的排放源^[1]。中国70%的二氧化碳排放来自于城市,预计这一比例在2030年将达到80%。根据国际能源机构(IEA)的数据,建筑业在城市碳排放中占比较大,全球近40%的能源消费都与建筑业相关^[2]。2019年,我国建筑领域碳排放量占碳排放总量的比重达到了21%^[3]。建筑部门作为用能大户,如何在建筑领域实现碳达峰、碳中和,对我国双碳目标的实现具有重要意义。

Apergis等^[4]研究了亚洲14个国家1990—2011年经济发展与碳排放之间的关系。Shahzad等^[5]采用自回归分布滞后模型对巴基斯坦的碳排放、贸易开放、能源消耗与金融发展之间的协整关系进行了实证研究。Cuéllar-Franca等^[6]、李海峰^[7]则利用碳排放系数对住宅建筑生命周期碳排放进行计算,得出运营阶段碳排放对整个建筑全生命周期的碳排放贡献最大。黄艳雁等^[8]利用实测法以武汉某办公大楼为研究对象,通过收集建筑外立面改造前后室内外温度数据,得出外墙双层表皮可对建筑碳排放减少起到积极作用。周观根等^[9]以装配式钢结构建筑为研究对象,基于生命周期理论对建筑各个阶段碳排放进行计算,并在横向上与混凝土结构作对比分析,得出装配式钢结构建筑相比于传统建筑可有效降低碳排放。

现有国内关于建筑碳核算方法的研究多立足于微观视角,对单体或某类型建筑物的碳排放进行核算,且多侧重于对新建建筑和建筑使用过程中的碳排放进行分析,缺乏对区域建筑碳排放的研究。区域建筑碳排放核算能揭示一定时间内区域建筑物在建筑材料准备、建造、使用、拆除处置和回收等阶段发生的碳排放总和,有助于后续识别建筑节能减排路径。本研究从生命周期视角出发,收集并整理上海市2010—2020年住宅与非住宅建筑建筑材料和能源消耗数据,并以住宅及非住宅建筑为研究对象,结合生命周期评价(LCA)方法及碳排放系数法对上海市建筑在建材生产、建筑施工(建造、拆除)以及建筑运营阶段的碳排放进行核算。

本研究构建了城市层面的碳排放核算框架和方法学体系,并以上海市为研究案例,在时间序列上对上海市建筑作出碳排放趋势分析,横向上

对比分析两种建筑类型(住宅建筑和非住宅建筑)碳排放量。该研究可为城市厘清自身建筑碳排放现状,以及为区域协同减排、共同实现双碳目标提供参考。

1 研究方法

1.1 上海市建筑碳排放核算模型

本研究关注的是建筑生命周期中主要碳排放阶段,包括建材生产、建筑施工(建造、拆除)和建筑运营阶段。利用排放因子法计算出2010—2020年上海市建筑生命周期各阶段碳排放量。本研究所涉及的建筑类型仅指民用建筑,包括:住宅、学校、办公建筑、商场店铺、医院、旅馆、交通枢纽、文体娱乐设施等,而不包括工业建筑。为易于讨论,将民用建筑中除住宅建筑外的其他建筑统称为非住宅建筑。通过对比上海市住宅建筑及非住宅建筑碳排放量,可以更好地把握上海市建筑碳排放特点和碳排放趋势,对后续提出针对性的减排对策具有积极意义。

1.1.1 建材生产阶段碳排放计算

建材生产阶段碳排放量可通过建材的使用量与其对应的碳排放因子乘积累加计算得出,即

$$C_{SC} = \sum_{i=1}^n M_i F_i \quad (1)$$

式中: C_{SC} 为建材生产阶段的碳排放量, kg CO_2 ; M_i 为第*i*种建筑材料的使用量, t ; F_i 为生产*i*种建材的碳排放因子, $\text{kg CO}_2/\text{单位建材数量}$ 。

1.1.2 建造及拆除阶段碳排放计算

建筑施工阶段碳排放量主要由建筑建造和拆除阶段产生的碳排放量组成,表示如下:

$$C_{SG} = \sum_{i=1}^n E_{JZ,i} E F_i + \sum_{i=1}^n E_{CC,i} E F_i \quad (2)$$

式中: C_{SG} 为建筑施工(建造、拆除)阶段产生的碳排放量, tCO_2 ; $E_{JZ,i}$ 为建造阶段第*i*种能源的使用量折算标煤量, tce ; $E_{CC,i}$ 为拆除阶段第*i*种能源的使用量折算标煤量, tce ; $E F_i$ 为第*i*种能源的碳排放系数, tCO_2/tce 。

1.1.3 运营阶段碳排放计算

建筑运营阶段碳排放主要是由建筑设备能耗

引起,如照明设备、通风设备、取暖设备、制冷设备等的使用。建筑运营阶段碳排放计算公式为

$$C_{YX} = \sum_{i=1}^n F_i U_i \quad (3)$$

式中: C_{YX} 为建筑运营阶段所产生的碳排放量; U_i 为第 i 类能源的消耗量; F_i 为第 i 类能源的碳排放系数。

1.2 数据来源

本文碳计算过程中所需的能耗数据和建材使用量均取自于《上海统计年鉴》^[10]和《中国建筑行业统计年鉴》^[11],能源和建材碳排放因子主要来自《GBT51366—2019 建筑碳排放计算标准》^[12]。

2 结果与分析

2.1 上海市建筑碳排放分析

2.1.1 建材生产阶段

建筑材料的选取参考《中国建筑行业统计年鉴》^[11],主要考虑了钢铁、水泥、铝材以及玻璃4类,其他建材能耗占比较小,在此忽略不计。按照上述计算方法,并结合表1中上海市建筑材料消耗量以及相应的碳排放因子^[12],计算得到2010—2020年上海市建筑建材生产阶段的碳排放量,如表2所示。

结果表明,2010—2020年上海市建材生产阶段碳排放持增长态势。建筑材料生产碳排放量由2010年的4776万t上升到2020年的8823万t,并在2019年碳排放量达到最高值(约1.28亿t),这主要是由于钢材、水泥、玻璃这3种建材使用量的突然增加导致的。从不同建材的碳排放占比来看,钢材的碳排放量在4种建筑材料中最高,占50%以上,其次是水泥、铝和玻璃,如图1所示。此外,由于钢材的碳排放因子比水泥大,即使水泥的消耗量大于钢材,但碳排放量仍小于钢材。

为进一步探讨上海市住宅及非住宅建筑在建材生产阶段的碳排放关系,本研究将建材生产阶段碳排放总量按照竣工面积进行分配,见表3。

由图2可知,在建材生产阶段,住宅及非住宅建筑碳排放量两者之间没有显示大小规律。2010,2011,2015,2017,2019这5年,非住宅建筑的碳排放量均大于住宅建筑。2010—2017年住宅与非住宅建筑的碳排放量差值不大,但从2018年开始两者的碳排放量差值逐年增大。2010—2018

表1 2010—2020年上海市建筑业建筑材料消耗量

Tab.1 Consumption of construction materials in Shanghai from 2010 to 2020

年份	钢材	水泥	玻璃	铝材	百万t
2010	13.64	21.62	0.06	0.19	
2011	14.62	23.24	0.08	0.21	
2012	15.23	21.12	0.09	0.52	
2013	15.79	21.58	0.53	0.37	
2014	16.77	22.86	0.09	0.40	
2015	15.07	17.38	0.09	0.36	
2016	14.49	18.33	0.08	0.35	
2017	16.69	20.20	0.08	0.50	
2018	16.94	18.95	0.10	0.90	
2019	30.73	50.62	0.09	1.36	
2020	27.36	24.11	0.05	0.71	

表2 2010—2020年上海市主要建材生产阶段碳排放量

Tab.2 Carbon emissions from major building materials production in Shanghai from 2010 to 2020

年份	钢材	水泥	铝材	玻璃	总计	百万t
2010	27.96	15.89	3.91	0.07	47.76	
2011	29.97	17.08	4.25	0.09	51.39	
2012	31.22	15.52	10.66	0.11	57.40	
2013	32.38	15.86	7.66	0.60	56.50	
2014	34.39	16.80	8.14	0.10	59.43	
2015	30.90	12.77	7.40	0.10	51.17	
2016	29.72	13.47	7.25	0.09	50.53	
2017	34.21	14.85	10.22	0.09	59.37	
2018	34.74	13.93	18.31	0.11	67.09	
2019	62.99	37.21	27.62	0.10	127.92	
2020	56.08	17.71	14.38	0.06	88.23	

年住宅建筑建材生产阶段碳排放量总体持波动增长态势,并于2019年达到峰值(5821万t)。而非住宅建筑建材生产阶段的碳排放量除2019年外,其余年份的碳排放量也呈现小幅度的波动性变化,2016年非住宅建筑的建材生产阶段碳排放量最小(2305万t),2019年碳排放量最大(6971万t)。

2.1.2 建造及拆除阶段

将宏观建筑生命周期施工(建造、拆除)阶段的能耗量等同于建筑企业每年的能耗量。通过查阅《上海统计年鉴》^[10]数据,并结合表4中施工

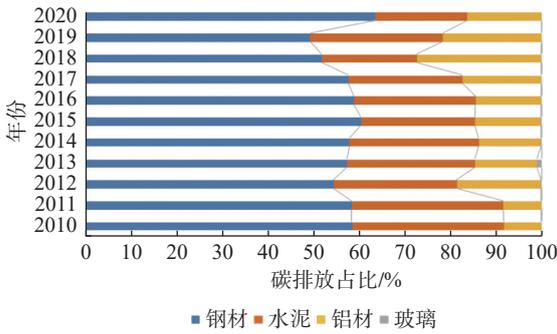


图1 2010—2020年上海市主要建筑材料生产碳排放占比

Fig.1 Carbon emission ratio of major building materials production in Shanghai from 2010 to 2020

表3 2010—2020年上海市住宅及非住宅建筑建材生产阶段碳排放量

Tab.3 Carbon emissions of residential and non-residential building materials in Shanghai from 2010 to 2020

年份	住宅房屋竣工面积 /百万m ²	住宅建筑碳排放量 /百万t	非住宅房屋竣工面积 /百万m ²	非住宅建筑碳排放量 /百万t	碳排放总量 /百万t
2010	27.36	21.07	34.81	26.80	47.76
2011	29.06	24.96	30.78	26.43	51.39
2012	33.72	29.89	31.04	27.51	57.40
2013	31.48	28.34	31.27	28.16	56.50
2014	39.06	30.62	36.75	28.81	59.43
2015	34.76	24.50	37.83	26.67	51.17
2016	40.69	27.48	34.12	23.05	50.53
2017	39.95	29.40	40.71	29.96	59.37
2018	42.74	36.36	36.12	30.73	67.09
2019	42.01	58.21	50.31	69.71	127.92
2020	48.45	52.44	33.06	35.79	88.23

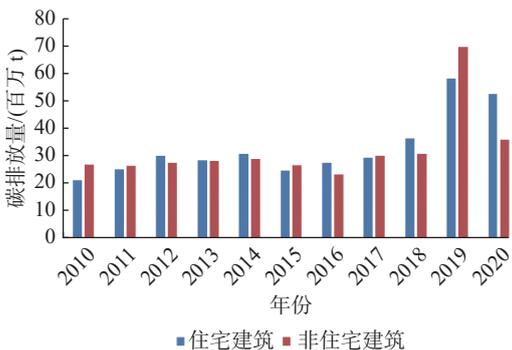


图2 2010—2020年上海市住宅及非住宅建筑建材生产阶段碳排放对比

Fig.2 Comparison of carbon emissions of residential and non-residential building materials in Shanghai from 2010 to 2020

(建造、拆除)阶段的能耗量和对应的碳排放因子^[13]，计算得到2010—2020年上海市建筑施工阶段碳排放量。

由表4可知，2010—2020年上海市建筑施工阶段碳排放量总体持增长态势，并在2020年碳排放量达到最高值(684万t)。

表4 2010—2020年上海市建筑施工(建造、拆除)能耗及碳排放量

Tab.4 Energy consumption and carbon emissions of building construction in Shanghai from 2010 to 2020

年份	消耗量/万tce	碳排放因子/(tCO ₂ ·tce ⁻¹)	碳排放量/百万t
2010	218.37	2.60	5.68
2011	212.76	2.60	5.53
2012	213.04	2.60	5.54
2013	213.75	2.60	5.56
2014	206.21	2.60	5.36
2015	219.61	2.60	5.71
2016	235.97	2.60	6.14
2017	240.8	2.60	6.26
2018	237.95	2.60	6.19
2019	249.56	2.60	6.49
2020	263.23	2.60	6.84

为进一步探讨上海市住宅及非住宅建筑在施工阶段的碳排放关系，本研究将施工阶段碳排放总量按竣工面积进行分配，见表5。由图3可知，在建筑施工(建造、拆除)阶段，住宅建筑和非住宅建筑的碳排放量没有显示大小规律。住宅及非住宅建筑施工阶段碳排放量持波动性变化，但波动幅度不大。2010—2020年间：住宅建筑施工碳排放量2010年出现最低值(250万t)，2020年碳排放量最高(407万t)。非住宅建筑施工碳排放量2014年最低(260万t)，2019年碳排放量最高(354万t)。

2.1.3 建筑运营阶段

本研究利用能源拆分法对上海市建筑运营阶段碳排放量进行拆分计算。因住宅和非住宅建筑在运营阶段能耗的覆盖范围存在差异，故在数据拆分时需分开处理。通过横向对比住宅建筑及非住宅建筑运行碳排放量，得出上海市民用建筑运行阶段碳排放特点和碳排放趋势，对提出有针对性的减排对策具有积极意义。

住宅建筑运营阶段能耗通过居民生活能耗剔

表5 2010—2020年上海市住宅及非住宅建筑施工(建造、拆除)阶段碳排放量

Tab.5 Carbon emissions in construction stage of residential and non-residential buildings in Shanghai from 2010 to 2020

年份	施工阶段碳排放总量 /百万t	非住宅建筑与住宅 建筑施工面积比	住宅建筑 碳排放量 /百万t	非住宅建筑 碳排放量 /百万t
2010	5.68	1.27	2.50	3.18
2011	5.53	1.06	2.69	2.84
2012	5.54	0.92	2.88	2.66
2013	5.56	0.99	2.79	2.77
2014	5.36	0.94	2.76	2.60
2015	5.71	1.09	2.73	2.98
2016	6.14	0.84	3.34	2.80
2017	6.26	1.02	3.10	3.16
2018	6.19	0.85	3.35	2.84
2019	6.49	1.20	2.95	3.54
2020	6.84	0.68	4.07	2.77

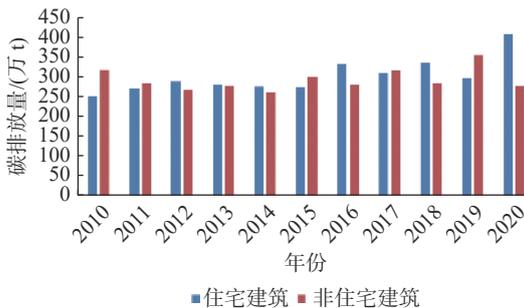


图3 2010—2020年上海市住宅及非住宅建筑施工阶段碳排放对比

Fig.3 Comparison of carbon emissions in construction stage of residential and non-residential buildings in Shanghai from 2010 to 2020

除交通使用能耗(汽油、柴油的消耗)得到。原煤碳排放因子由标煤碳排放因子换算得到(1.86t CO₂/t)。2010—2019年电力碳排放系数取自于中国区域电网的基线碳排放因子(华东区域), 2020年电力碳排放系数则取自于《上海市温室气体排放核算与报告指南(试行)》。热力碳排放因子方面则采用蔡伟光等^[14]基于能源平衡表法计算得到的2000—2017年全国热力碳排放因子(0.13t CO₂/GJ)来确定。基于式(3), 计算得到2010—2020年上海市住宅建筑运营阶段各能源消耗碳排放结果, 见表6。

由表6可知, 2010—2020年住宅建筑运营阶

表6 2010—2020年上海市住宅建筑运营阶段碳排放量

Tab.6 Carbon emissions in operation stage of residential buildings in Shanghai from 2010 to 2020

年份	原煤碳排放量	电力碳排放量	热力碳排放量	总计
2010	86.77	1452.97	0.74	1540.48
2011	80.63	1471.85	2.65	1555.13
2012	76.61	1536.52	0	1613.13
2013	63.37	1660.82	0.02	1724.21
2014	62.44	1408.51	0.02	1470.97
2015	56.19	1502.47	0.04	1558.70
2016	35.73	1763.53	0	1799.26
2017	7.44	1830.32	0	1837.76
2018	7.44	1924.05	0	1931.49
2019	7.44	1935.82	0	1943.26
2020	7.44	2031.41	9.0324	2047.88

段碳排放持增长态势, 并在2020年碳排放量达到峰值, 为2047.88万t。电力消耗产生的碳排放量对运营阶段碳排放贡献最大, 约占90%。与总体运营阶段碳排放趋势一致, 2010—2020年电力消耗碳排放量也呈增长态势, 并在2020年达到峰值, 为2031.41万t。与之相反的是, 2010—2020年原煤消耗碳排放量持下降态势, 且总量占比较小, 并在2017达到最低值, 为7.44万t。与其他两类能源消耗产生的碳排放相比, 热力碳排放量所占比重很小, 但2020年突然加大了热力消耗, 造成约9万t碳排放量。

非住宅建筑运营阶段, 本研究从第三产业的各种能源消耗量减去运输业、仓储和邮政业能耗, 得到非住宅建筑运营阶段能耗^[15], 进而得到相关碳排放。2010—2020年上海市第三产业、交通运输、仓储和邮政业能源终端消费量可从上海统计年鉴获得。原始数据进行能源拆分后得到2010年其他石油制品消耗量为0.01万t, 其他年份未有消耗量, 上海市非住宅建筑运营阶段能耗数据见表7。碳排放因子方面, 燃料油、汽油、柴油的碳排放因子均来自于文献^[14], 煤油、其他油制品的碳排放因子来自国家标准^[12], 能源终端消费量从《上海统计年鉴》获得。计算得到2010—2020年上海非住宅建筑运营阶段碳排放量, 如表8所示。

表7 2010—2020年上海市公共建筑运营阶段能耗量

Tab.7 Energy consumption in operation stage of public buildings in Shanghai from 2010 to 2020

年份	原煤/ 万t	燃料油/ 万t	汽油/ 万t	煤油/ 万t	柴油/ 万t	热力/ 万GJ	电力/ 亿kW·h
2010	88.14	8.25	123.27	0.04	164.68	139.37	274.44
2011	84.64	8.00	144.46	0.04	181.76	117.18	286.95
2012	83.16	5.41	159.96	0.05	212.51	103.47	304.40
2013	69.42	4.85	151.49	0.07	211.72	86.99	325.38
2014	68.70	5.06	169.30	0.01	219.40	78.51	327.18
2015	58.99	5.04	162.64	0.02	208.23	116.51	347.53
2016	41.99	0	173.47	0.02	221.40	141.49	375.38
2017	4.00	0	181.64	0	232.36	83.61	398.59
2018	4.00	0	156.80	0	165.49	106.07	438.62
2019	3.60	0.16	155.10	0	161.49	48.75	465.21
2020	3.20	0	148.60	0	166.70	45.21	438.61

由表8可知,2010—2020年公共建筑运营阶段碳排放持增长态势,并在2017年碳排放量达到峰值,为3111.68万t。运营阶段中电力消耗产生的碳排放量占比最大,且有逐年上升的趋势;其次为柴油和汽油;原煤消耗产生的碳排放量占比不足10%,且在2016年之后所占比重急速下降。其他石油制品和煤油消耗碳排放量占比很小,与其他能源消耗碳排放量不是同等数量级。

表8 2010—2020年上海市公共建筑运营阶段碳排放量

Tab.8 Carbon emissions in operation stage of public buildings in Shanghai from 2010 to 2020

年份	原煤	燃料油	汽油	煤油	柴油	热力	电力	其他石油制品	总量
2010	163.94	26.15	361.18	0.01212	510.51	18.12	1451.62	0.00289	2531.67
2011	157.43	25.36	423.27	0.01212	563.46	15.23	1466.07	0	2650.94
2012	154.68	17.15	468.68	0.01515	658.78	13.45	1544.76	0	2857.65
2013	129.12	15.37	443.87	0.02121	656.33	11.31	1660.82	0	2917.03
2014	127.78	16.04	496.05	0.00303	680.14	10.21	1407.64	0	2737.89
2015	109.72	15.98	476.54	0.00606	645.51	15.15	1504.69	0	2767.65
2016	78.10	0	508.27	0.00606	686.34	18.39	1760.48	0	3051.64
2017	7.44	0	532.21	0	720.32	10.87	1840.84	0	3111.68
2018	7.44	0	459.42	0	513.02	13.79	1933.06	0	2926.73
2019	6.70	0.51	454.44	0	500.62	6.34	1940.96	0	2909.57
2020	5.95	0	435.40	0	516.77	5.88	2026.26	0	2990.26

图4展示了上海市住宅建筑与公共建筑运营阶段碳排放量。从变化趋势来看,2010—2020年住宅与非住宅建筑运营阶段碳排放量变化相似,都呈波动上升趋势。2010—2020年上海市住宅建筑运营阶段碳排放量均小于非住宅建筑,且碳排放量差值在2017年之后呈递减趋势。

2.1.4 建筑生命周期碳排放结果讨论

对上海市住宅和非住宅建筑各生命周期碳排放量进行相加,得到2010—2020年上海市整体建筑各阶段碳排放量数据。如表9所示,2010—2020年上海市建筑生命周期碳排放总量持波动增长态势,建筑碳排放总量由2010年的9416万t上升到2020年的14545万t。其中,2019年建筑生命周期碳排放总量最高,为18294万t,这是因建材生产阶段碳排放显著增长所导致的。

将表9中生命周期各阶段数据按年份汇总至图5。可见,建材生产和建筑运营是建筑碳排放占比最大的两个阶段,远超建筑施工阶段产生的碳排放量。分别分析各阶段的碳排放情况,发现除2019年外,其余年份各阶段碳排放量都呈增长态势,但变化幅度较小。

按建筑类型将表9中生命周期各阶段碳排放量进行拆分,比较分析住宅与非住宅建筑在建材生产、施工和运营3个阶段的碳排放量(见图6),得到2010—2019年住宅建筑整体碳排放总量小于

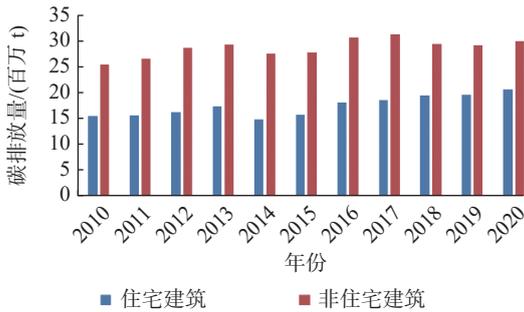


图4 2010—2020年上海市住宅及非住宅建筑运营阶段碳排放量
Fig. 4 Carbon emissions in operation stage of residential and non-residential buildings in Shanghai from 2010 to 2020

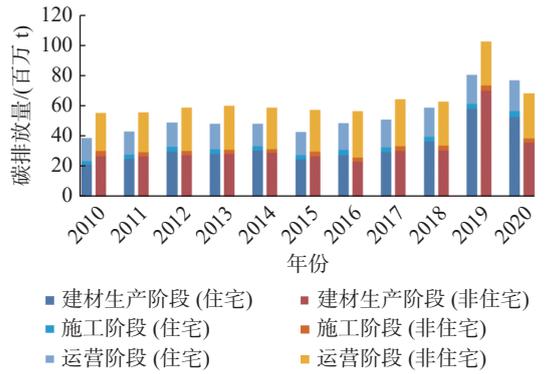


图6 2010—2020年上海市住宅及非住宅建筑生命周期碳排放对比
Fig. 6 Comparison of life cycle carbon emissions of residential and non-residential buildings in Shanghai from 2010 to 2020

表9 2010—2020年上海市住宅及非住宅建筑生命周期碳排放总量
Tab.9 Total carbon emissions in life cycle stages of residential and non-residential buildings in Shanghai from 2010 to 2020

年份	建材生产阶段	建筑施工阶段	建筑运营阶段	总计
2010	47.76	5.68	40.72	94.16
2011	51.39	5.53	42.06	98.98
2012	57.40	5.54	44.71	107.65
2013	56.50	5.56	46.41	108.47
2014	59.43	5.36	42.09	106.88
2015	51.17	5.71	43.27	100.15
2016	50.53	6.14	48.51	105.18
2017	59.37	6.26	49.50	115.13
2018	67.09	6.19	48.58	121.86
2019	127.92	6.49	48.53	182.94
2020	88.23	6.84	50.38	145.45

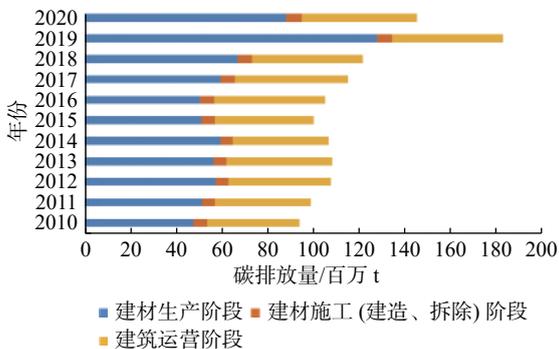


图5 2010—2020年上海市建筑生命周期各阶段碳排放量
Fig. 5 Carbon emissions in life cycle stages of buildings in Shanghai from 2010 to 2020

非住宅建筑整体碳排放总量。2010—2020年住宅建筑运营阶段碳排放量总是小于非住宅建筑运营碳排放量, 其他两阶段未显示这种规律。

3 结论与建议

本研究以上海市住宅及非住宅建筑为研究对象, 基于生命周期理论, 从城市层面核算出上海市建筑领域碳排放量, 并对碳排放量作出对比和分析, 现将主要结论总结如下:

a. 2010—2020年上海市建筑碳排放总量呈波动增长趋势, 建筑碳排放总量从2010年的9416万t增长到2020年的14545万t。

b. 建材生产和运营阶段是建筑碳排放的主要阶段, 减排策略应重点关注。钢材生产碳排放量是建材生产阶段中碳排放量的主要构成部分, 占比在50%以上, 其次是水泥和铝材。而建筑施工(建造、拆除)阶段碳排放量占比较小(低于10%)。2010—2020年建筑施工碳排放总体持稳定上升趋势, 且波动较小。2020年碳排放量达到最高值, 为684万t。对于运营阶段, 住宅与非住宅建筑主要碳排放来源相似, 均为电力消耗。从变化趋势来看, 2010—2020年住宅与非住宅建筑运营阶段碳排放量变化相似, 都呈波动上升趋势。住宅建筑运营阶段碳排放量在2020年达到最高值(2048万t), 而非住宅建筑运营阶段碳排放量在2017年达到峰值(3112万t)。

c. 从建筑类型上来看, 2010—2020年住宅建筑运营阶段碳排放量总是小于非住宅建筑, 在其他两阶段未显示这种规律。

d. 上海市建筑碳排放存在总量大、总量持续增长、建材生产阶段及运营阶段占比高等特点。

根据上海市建筑生命周期碳排放量核算结果可得到建筑碳排放的主要来源与减排关键点, 本研究提出如下减排建议:

a. 在建筑减碳路径方面, 建材生产阶段由于钢材、水泥等高碳建材的使用导致碳排放量占比较大, 可通过大力推广绿色建材的应用, 将碳排放强度作为绿色建材认定的关键指标, 发展具有固碳能力的建材来达到减排目的。

b. 运营阶段碳排放主要来源于电力消耗, 可通过外墙保温设计、新型建筑板材使用等措施来减少建筑的能源需求, 采用LED照明技术与产品、光热光伏系统建筑一体化设计等技术来提升建筑能源的使用效率, 采用分布式能源^[16]进而来减少相关碳排放。

c. 对于碳排放占比较小的建筑施工(建造、拆除)阶段, 可以通过推行绿色施工技术来降低相关碳排放, 如预制装配式技术的应用、BIM智慧化施工技术等措施; 在建筑设计规划阶段可参照相关建筑节能标准、方案比选等措施从源头降低相关碳排放。

参考文献:

- [1] 郭芳, 王灿, 张诗卉. 中国城市碳达峰趋势的聚类分析[J]. *中国环境管理*, 2021, 13(1): 40–48.
- [2] 张雅欣, 罗荟霖, 王灿. 碳中和行动的国际趋势分析[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(1): 88–97.
- [3] 陈焰华, 於仲义. 从建筑碳排放达峰看地热能的技术特性[J]. *暖通空调*, 2022, 52(1): 75–80.
- [4] APERGIS N, OZTURK I. Testing environmental Kuznets curve hypothesis in Asian countries[J]. *Ecological*

Indicators, 2015, 52: 16–22.

- [5] SHAHZAD S J H, KUMAR R R, ZAKARIA M, et al. Carbon emission, energy consumption, trade openness and financial development in Pakistan: a revisit[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 70: 185–192.
- [6] CUÉLLAR-FRANCA R M, AZAPAGIC A. Environmental impacts of the UK residential sector: life cycle assessment of houses[J]. *Building and Environment*, 2012, 54: 86–99.
- [7] 李海峰. 上海地区住宅建筑全生命周期碳排放量计算研究[C]//城市发展研究——第7届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集. 北京: 中国城市科学研究会, 2011.
- [8] 黄艳雁, 陈宏, 袁黎. 夏热地区建筑表皮节能改造的隔热效果实测与分析[J]. *桂林理工大学学报*, 2014(2): 278–282.
- [9] 周观根, 周雄亮. 基于生命周期评价的钢结构建筑能耗与碳排放分析[C]//中国建筑金属结构协会. 钢结构与绿色建筑技术应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [10] 上海市统计局, 国家统计局上海调查总队. 2011–2021上海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011–2021.
- [11] 国家统计局固定资产投资统计司. 2010–2021中国建筑统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011–2021.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 51366—2019, 建筑碳排放计算标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 21–37.
- [13] 龙惟定, 梁浩. 我国城市建筑碳达峰与碳中和路径探讨[J]. *暖通空调*, 2021, 51(4): 1–17.
- [14] 蔡伟光, 蔡彦鹏. 全国建筑碳排放计算方法研究与数据分析[J]. *建设管理研究*, 2019(2): 61–76.
- [15] 方定琴. 上海市建筑能源消耗的估算与分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [16] 赵振宇, 杨雨佳, 郭润凡. 北京分布式能源项目规划建设的问题与对策[J]. *能源研究与信息*, 2021, 37(2): 78–84.

(编辑: 丁红艺)